



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**PYROELEKTRICKÝ JEV V TECHNICKÉ PRAXI**

PYROELECTRIC EFFECT IN TECHNICAL APPLICATIONS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tereza Motlová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Studentka: **Tereza Motlová**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Mechatronika  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Pyroelektrický jev v technické praxi

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Parazitní teplo se vyskytuje v řadě technických soustav a využití tzv. teplotních vibrací v technické praxi může být zajímavé např. pro senzorku a nebo generování elektrické energie. Pyroelektrické vlastnosti mají všechny piezokeramické materiály a cílem práce bude tento jev popsat a vytvořit rešerši využití v technické praxi. Pro možnosti vývoje pyroelektrických technických aplikací je důležitý matematický popis tohoto jevu a jeho simulační model na dané rozlišovací úrovni.

### Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše využití pyroelektrického jevu v technické praxi.
2. Teoretický popis pyroelektrického jevu.
3. Analýza možností modelování tohoto jevu a jeho simulační modely.
4. Zhodnocení tohoto principu jako autonomního zdroje energie pro zvolenou aplikaci.

### Seznam doporučené literatury:

BOWEN, C. R., H. KIM, P. M. WEAVER a S. DUNN, 2014. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. Energy & Environmental Science. 7(1), 25. ISSN 1754-5692.

BOWEN, C. R., J. TAYLOR, E. LEBOULBAR, D. ZABEK, A. CHAUHAN a R. VAISH, 2014. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. Energy & Environmental Science [online]. 00, 1–21. ISSN 1754-5692.

BATRA, A. K., Sudip BHATACHARJEE a A. K. CHILVERY, 2011. Energy harvesting roads via pyroelectric effect: a possible approach. 803519(May 2011), 803519. ISSN 0277786X.

TAO, J., J. HU a G. WU, 2016. Energy harvesting from pavements via PVDF: hybrid piezo-pyroelectric effects. (April 2016), 97992L. ISSN 1673-565X.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá použitím pyroelektrického jevu jako zdroje elektrické energie. Je v ní popsán jeho matematický model, který je dále převeden do grafického programovacího prostředí Simulink. Obsahuje řešerši využití tohoto fyzikálního jevu v technické praxi a zhodnocení pro které aplikace je vhodný.

## Summary

The focus of this bachelor thesis is pyroelectric effect and its use for energy harvesting. Mathematical model of pyroelectric harvester was described, and then recreated in MATLAB-based graphical programming environment Simulink. Various applications of pyroelectric materials were researched, and their use as sources of electricity was evaluated.

## Klíčová slova

Pyroelektrický jev, pyroelektrické materiály, energy harvesting, PZT, alternativní zdroje elektrické energie

## Keywords

Pyroelectric effect, pyroelectric materials, energy harvesting, PZT, alternative sources of power

## Bibliografická Citace

MOTLOVÁ, Tereza. *Pyroelektrický jev v technické praxi*. Brno, 2021. Dostupné také z: <<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132326>>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Pyroelektrický jev v technické praxi“ vypracovala samostatně pod vedením vedoucího doc. Zdeňka Hadaše a s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

**Tereza Motlová**

Brno . . . . .

Na tomto místě bych chtěla poděkovat doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za jeho vedení, cenné rady, připomínky a trpělivost během zpracování mé bakalářské práce. Dále přátelům a rodině za podporu během celé doby studia.

**Tereza Motlová**

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Pyroelektrický jev</b>	<b>10</b>
2.1	Historie . . . . .	11
2.2	Krystalové mřížky pyroelektrických materiálů . . . . .	12
2.3	Primární a sekundární pyroelektrina . . . . .	13
2.4	Materiály produkující pyroelektrinu . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Využití pyroelektrických generátorů</b>	<b>15</b>
3.1	Pozemní komunikace . . . . .	15
3.2	Tření v brzdovém systému vozidel . . . . .	17
3.3	Chladič z kapiláních trubek . . . . .	17
3.4	Senzor využívající teplo lidského těla . . . . .	18
3.5	Tepelná energie z chemických procesů . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Matematický model pyroelektrického jevu</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Simulace pyroelektrického jevu</b>	<b>24</b>
5.1	Zpracování v Simulinku . . . . .	24
5.2	Výsledky simulací . . . . .	25
5.2.1	Porovnání materiálů PZT, PVDF a BaTiO <sub>3</sub> . . . . .	25
5.2.2	Aplikace PZT jako zdroj pro bezdrátový senzor . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>31</b>





# 1 Úvod

V dnešním světě plném moderních technologií se stáváme stále více závislími na elektrické energii a nároky na její množství a kvalitu celosvětově stoupají. Přidáme-li k tomuto faktu i vyhlídku neodkladného vyčerpání fosilních paliv, otázka jak elektřinu vyrobit, abychom neustále rostoucím nárokům na její spotřebu vyhověli, se stává stále více palčivou. Z tohoto důvodu roste zájem o různé alternativní zdroje elektrické energie a jejich výzkum a vývoj. Celkově lze říct, že je výzkum této oblasti a využívání jeho výsledků podporováno, ať už společensky, v podobě rostoucího důrazu na ekologii a soužití člověka s přírodou obecně, tak i v rámci finančních příspěvků od nejrozličnějších organizací a států. Díky těmto příspěvkům je mimo jiné urychlen například rozmach solárních panelů, čehož si lze všimnout při pohledu na venkovskou krajinu, ale i městskou zástavbu.

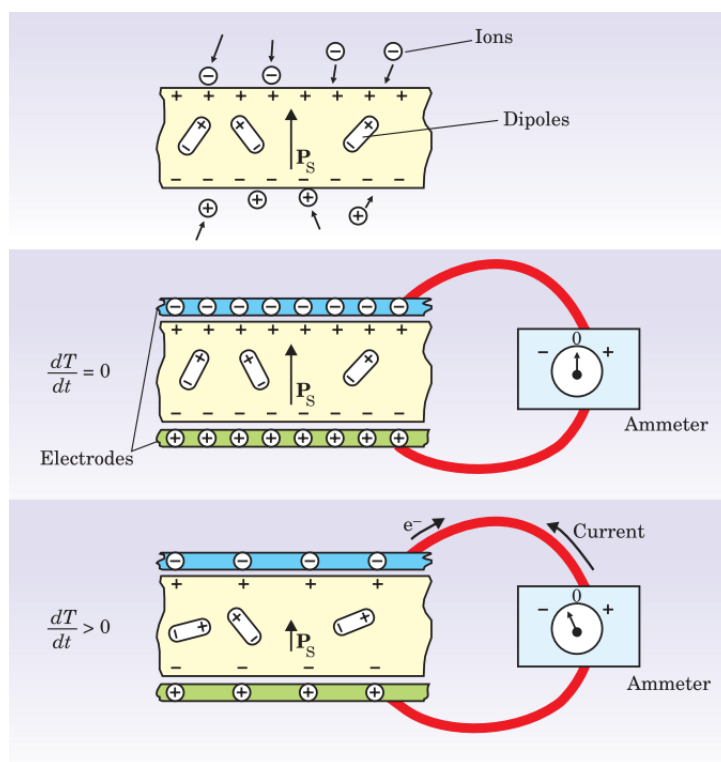
Tyto zdroje obnovitelné energie se nachází všude kolem nás, ať už ve formě světla, vody, větru nebo biomasy. Jednou z nich je i energie tepelná. Kromě energie geotermální, která se v našich zeměpisných šířkách nevyužívá, do této kategorie patří i teplo odpadní. Zde máme štěstí větší, protože toto teplo je častým vedlejším produktem u většiny technologických a chemických procesů, například ve formě tření, teplých plynů ze spalování, vody ohřívající se při ochlazování strojů a dalších.

Generovat elektřinu z tohoto tepla je možné pomocí termoelektrického efektu, ten však ke svému fungování potřebuje velký teplotní gradient, kterého nelze vždy spolehlivě dosáhnout. Zvláště, bereme-li v potaz teplotní děje, které se mění v čase a probíhají rychleji, nebo v menším měřítku. Existuje však další způsob, jak tepelnou energii přeměnit na energii elektrickou, vhodný přesně k tomuto typu tepelných dějů. Tím je pyroelektrický jev. Právě jemu se věnuji v této bakalářské práci, rozeberu jak funguje a nastíním na základě jeho fyzikální podstaty jeho použití v praxi.

## 2 Pyroelektrický jev

K pyroelektrickému jevu dochází v tzv. pyroelektrických materiálech – tyto materiály vytváří elektřinu při změnách teploty. Jak je uvedeno v článku [1], vyznačují se tím, že se pozitivně a negativně nabité atomy v jejich krystalové mřížce nachází mimo rovnovážné pozice. Náboje se tak mezi sebou nevyruší, ale jsou v rámci mřížky rozdělené na kladný a záporný. Uvnitř pyroelektrického materiálu nám tak vzniká elektrický dipól.

Dipólový moment, jiným názvem spontánní polarizace  $P_s$ , existuje i bez působení elektrického pole. Jak je popsáno v [2], pokud nedochází ke změně teploty, je tento dipól statický a polarizace  $P_s$  je konstantní. Ale při zahřívání se začne zmenšovat vzdálenost mezi pozitivními a negativními náboji, proto se polarizace uvnitř materiálu snižuje. Přerozdělování nábojů během zahřívání způsobuje dočasné napětí, které je měřitelné na povrchu materiálu.



Obrázek 2.1: Dipóly uvnitř pyroelektrického vzorku a jeho polarizace (převzato z [2])

## 2 PYROELEKTRICKÝ JEV

Když jsou k protilehlým stranám tenkého vzorku připojeny elektrody s ampérmetrem, je možné změřit, že obvodem protéká elektrický proud (viz obr. 2.1). Často jsou používány elektrody z niklu nebo stříbra. Pokud je vzorek místo zahřívání ochlazován, polarizace se zvyšuje a elektrický proud proudí opačně. Jestliže je rozdíl teplot při ochlazování stejný, jako byl při ohřívání, množství vytvořené elektřiny je stejné (pouze její polarita je opačná, více v článku [3]). Když se teplota vzorku přestane měnit, dojde k ustálení a napětí i proud zmizí.

Procházející proud se vypočítá vztahem (viz článek [4]):

$$i_p = \frac{dQ}{dt} = A \cdot p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.1)$$

Kde  $Q$  (C) je elektrický náboj měnící se v čase  $t$  (s). Tento náboj je závislý na ploše vzorku  $A$  ( $m^2$ ), teplotě  $T$  (K) a pyroelektrickém koeficientu  $p$  ( $C/m^2K$ ). Ten je definován vztahem [4]:

$$p = \frac{dP_s}{dT} \quad (2.2)$$

Pyroelektrický koeficient je vektorová veličina. Jeho velikost závisí na změně spontánní polarizace  $P_s$ . Čím větší pyroelektrický koeficient je, tím větší proud je získán. Dalším způsobem, jak získat více proudu je zvětšením povrchu vzorku a větším rozdílem teploty za čas. Naopak tloušťka vzorku nemá na množství vzniklého proudu žádný vliv (viz [4]). Mohou se tak použít i velmi tenké vrstvy pyroelektrických materiálů [1] např. s tloušťkou do 250  $\mu m$ .

### 2.1 Historie

Jak se můžeme dočíst v článcích [2] a [3], první dochovaná zmínka o pyroelektrickém jevu pochází z 4. století př. n. l. – řecký filozof Theophrastus popsal kámen, který nazval lyngourion. Ten byl schopný k sobě přitahovat malé objekty, jako jsou stébla a kousky dřeva. Pravděpodobně se jednalo o minerál dnes spíše známý jako turmalín.

Fyzikální vlastnosti turmalínu byly blíže popsány v 18. století Johannem George Schmidtem v knize Curiöse Speculationes bey Schlaflosen Nächten (Curious Speculations During Sleepless Nights). Schmidta turmalín zaujal tím, že po vložení do rozpáleného uhlí k sobě byl schopen přitahovat a následně odpuzovat popel, přestože postrádal magnetické vlastnosti. První, kdo přišel s myšlenkou, že vlastnosti turmalínu mají elektrický původ, byl Carl von Linné roku 1747, který ho nazval „Lapis Electricus“. Na turmalínu bylo následně prováděno mnoho pokusů, které se významně podepsaly na tehdejší vývoji oboru elektrostatiky.

Pojem „pyroelektrina“ byl poprvé použit až roku 1824 fyzikem Davidem Brewsterem. O 35 let později John Mothée Gaugain provedl první přesnější měření pyroelektrického

## 2 PYROELEKTRICKÝ JEV

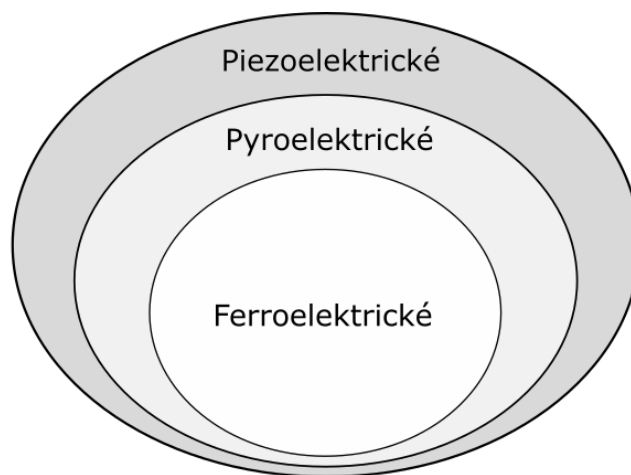
náboje a došel k základním zjištěním o tom, jak funguje. Ta se týkala množství elektřiny, která je turmalínem vytvořena, rozložení náboje a závislosti napětí na průřezu vzorku.

Roku 1938 Yeou Ta publikoval studii, ve které navrhl použití turmalínu v IR (infrared) senzorech pro spektroskopii. Další zajímavé využití pyroelektrického jevu navrhl profesor Sidney B. Lang r. 1962 – a to pro měřiče teploty s přesností až  $0,2 \mu\text{K}$ . Následovalo období nárůstu zájmu o pyroelektrické materiály, během kterého proběhlo mnoho studií a měření. Dodnes se jedná o stále se rozvíjející oblast.

### 2.2 Krystalové mřížky pyroelektrických materiálů

Pyroelektrické vlastnosti mají materiály ve svém pevném skupenství, když jejich krystalová mřížka postrádá centrum symetrie a má maximálně jednu osu rotační symetrie. Podle tvaru elementární buňky rozlišujeme krystalové mřížky na 7 druhů: trojklonná (nejvíce asymetrická), jednoklonná, kosočtverečná, čtverečná, krychlová, šesterečná a klencová. Tyto mřížky můžeme podle jejich symetrie dále rozdělit na 32 krystalových struktur, z nichž 12 je symetrických.

Zbylých 20 postrádá centrum symetrie a je schopno produkovat elektrickou energii, když dojde k jejich deformaci (dochází v nich k tzv. piezoelektrickému jevu). Pouze 10 z nich je pyroelektrických, protože ostatní mají více jak jednu osu rotační symetrie. Jen malá část pyroelektrických materiálů je i ferroelektrických. Všechny ferroelektrické materiály jsou tak i pyroelektrické a všechny pyroelektrické materiály jsou piezoelektrické (viz obr. 2.2). Více informací o krystalových mřížkách těchto materiálů se nachází v článcích [2] a [3].

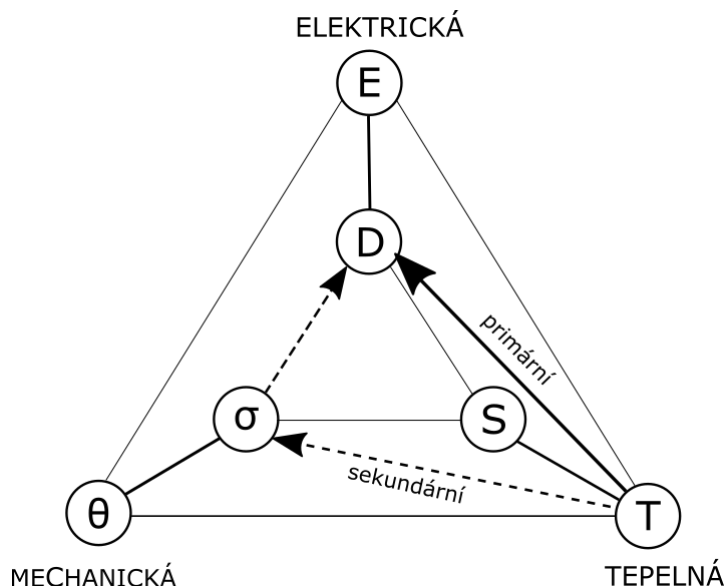


Obrázek 2.2: Vztahy mezi piezoelektrickými, pyroelektrickými a ferroelektrickými materiály (převzato z [4])

Ferroelektrické materiály se vyznačují tím, že když na ně působí silné elektrické pole, může být změněn směr jejich polarizace. Tyto materiály jsou charakterizovány tzv. Curieovou teplotou ( $T_c$ ) [2], což je nejvyšší možná teplota, při které si materiál zachovává svou polarizaci. Při jejím překročení polarizace velmi prudce klesá.

## 2.3 Primární a sekundární pyroelektřina

Na obrázku 2.3 je znázorněna přeměna energií uvnitř materiálu s pyroelektrickými vlastnostmi. Lze na něm dobře vysvětlit, jak funguje pyroelektrický systém z makroskopického pohledu. V každém z rohů většího trojúhelníku je znázorněna jedna z energií – mechanická (levý dolní roh), tepelná (pravý dolní roh) a elektrická (nahore).



Obrázek 2.3: Znázornění přeměn energií uvnitř pyroelektrického materiálu (převzato z [2])

Fyzikální veličiny v diagramu:

- $\theta$  (-) – deformace/přetvoření
- $\sigma$  (Pa) – mechanické napětí
- $S$  ( $JK^{-1}$ ) – entropie
- $T$  (K) – teplota
- $E_p$  ( $Vm^{-1}$ ) / ( $NC^{-1}$ ) - intenzita elektrického pole
- $D$  ( $Cm^{-2}$ ) – elektrická indukce

Jak je popsáno v článcích [2] a [3], tyto veličiny jsou na sobě vzájemně závislé, při změně jedné z nich dojde ke změně ostatních. Pyroelektrický jev je změna teploty ( $T$ ) na elektrickou indukci ( $D$ ) a na diagramu je znázorněn šipkami. Existují 2 druhy pyroelektrického efektu. Tzv. „primární“ pyroelektřina (znázorněna šipkou s plnou linií) – vzorek je omezen tak, že se nemůže rozpínat. Čárkovanou linií je označena „sekundární“ pyroelektřina – vzorek se může volně deformovat, dochází tak i k piezoelektrickému efektu.

## 2.4 Materiály produkující pyroelektřinu

Pyroelektrický jev byl pozorován v různorodých materiálech – od minerálů (turmalín), přes keramiku (PZT,  $\text{BaTiO}_3$ ) až k jednotlivým krystalům (triglycin sulfát). Dalšími pyroelektrickými materiály jsou některé polymery, jedním z nich je Polyvinylidenfluorid (PVDF). Elektrický proud mohou vytvářet i tkáně rostlin a živočichů, protože pyroelektrický jev probíhá v kolagenu, což dokázala měření prováděná na kostech, více o těchto materiálech a pokusech je popsáno v článcích [2] a [3].

V tabulce 2.1 jsou vypsány pro nás dostupné pyroelektrické materiály i s jejich pyroelektrickým koeficientem  $p$  a permitivitou  $\epsilon_r$ . Prvním z nich je nejpoužívanější pyroelektrický materiál PZT (titaničitan-zirkoničitan olovnatý), chemickým vzorcem  $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ . Jak je zmíněno v [5], PZT je keramický materiál s lepšími vlastnostmi a vyšší provozní teplotou, než do té doby používaný  $\text{BaTiO}_3$  (Barium Titanate, v tabulce 2.1 dole). Dalším pro nás důležitým materiálem je již zmíněný polymer PVDF. Pro svou dobrou chemickou a tepelnou odolnost je vhodný pro použití např. v chemickém průmyslu. (viz [6])

materiál	$p$ ( $\mu\text{C}/\text{m}^2\text{K}$ )	$\epsilon_r$
PZT	-380	290
PVDF	-27	9
$\text{BaTiO}_3$	-200	1200

Tabulka 2.1: Pyroelektrické materiály (hodnoty převzaty z [7])

## 3 Využití pyroelektrických generátorů

Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na energii v průmyslových i rozvojových zemích, rychlému vyčerpávání fosilních paliv a rostoucímu důrazu na ekologii stoupá zájem o výzkum v oblasti alternativních zdrojů elektrické energie. Obnovitelné zdroje jsou jednou z možností, jak předcházet potížím s energetickým zásobováním a energetickým krizím, ať už se jedná o výrobu elektrické energie ze světla, vibrací, pohybu, nebo tepla (více informací o těchto tématech v [8], [9] a [10]).

V průmyslu i prostředí okolo nás se nachází mnoho tepelných zdrojů, které mohou být využity pro generování elektřiny. Jsou jimi teplá voda vznikající při ochlazování strojů, spalovací motory v autě, mikroprocesory, chemické procesy, geotermální zdroje, ale i ty méně typické jako např. tření nebo teplo lidského těla.

Některé z těchto zdrojů tepla jsou těžko využitelné konvenčními metodami. Jedním ze způsobů, jak z nich elektrickou energii získat, je termoelektrický efekt. Aby mohl být použit, musí být mezi dvěma konci vodiče velký teplotní gradient (viz [11]) Použití termoelektrických generátorů je proto omezeno, protože vysokého gradientu u mnoha zdrojů tepla nelze dosáhnout. Odpadní teplo v těchto případech zůstává nevyužito. Alternativní metodou, jak lze tyto druhy tepelné energie využít je pyroelektrický jev.

Momentálně jsou pyroelektrické materiály využívány především jako senzory, jejichž použití je velmi široké. Od detekce požárů, analýzy plynů, až po pohybové detektory k zabezpečení budov. Více informací o těchto detektorech je popsáno v článkách [10] a [12]. V poslední době však roste zájem o jejich využití za účelem „energy harvesting“, což je získávání relativně malého množství energie, která může být dále využita např. k napájení nízkopříkonových zařízení.

### 3.1 Pozemní komunikace

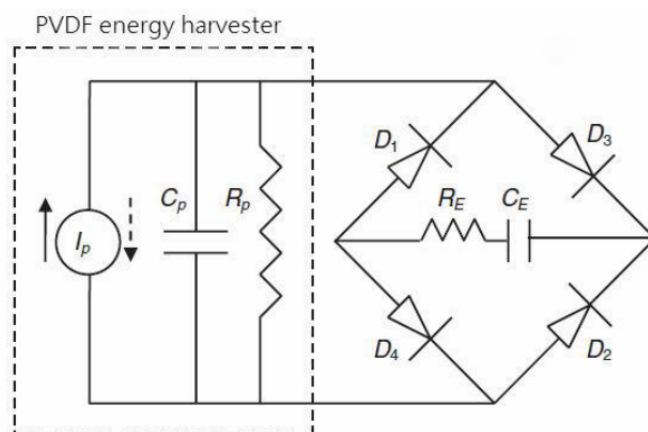
Výhodou získávání elektrické energie pomocí pyroelektrického jevu je fakt, že změny teplot jsou běžnou součástí každodenního života. Jedním z míst, kde k těmto tepelným změnám pravidelně dochází je povrch silnic a chodníků. „Podle Ředitelství silnic a dálnic ČR bylo v Česku k 1. 1. 2016 téměř 55 738 km silnic a dálnic.“ [13] Jedná se tak o velký potenciální zdroj elektrické energie, který zatím zůstává nevyužit. Elektrická energie z nich získaná může být následně uložena v kondenzátorech, nebo využita pro bezdrátové senzory a další zařízení, kterým stačí k fungování nízký příkon. Jedním z článků, který se tímto tématem zabývá je [14].

Za účelem přeměny tepelné energie pozemních komunikací na elektrickou, byly testovány modely z různých pyroelektrických materiálů. V článku [10] bylo zjištěno, že pro tuto

### 3 VYUŽITÍ PYROELEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ

aplikaci může být použit i běžný materiál jako např. Portlandský cement. Ten sám o sobě vykazuje pyroelektrické vlastnosti, ale pro jejich zvýšení do něj byla přidána uhlíková nanovlákna.

Dalším ze zkoušených materiálů byl PZT (viz [15]). Nejlepší způsob, jak tento materiál integrovat do silnic je potřeba lépe prozkoumat, protože vzhledem k jeho přirozené křehkosti jej nelze použít přímo. Jedním z pokusů, jak problém vyřešit, bylo vytvoření kovového boxu, který byl naplněn PZT disky, ale tento způsob není vhodný pro svou objemnost. Navíc by jím byl povrch silnice narušen z důvodu velkých mechanických rozdílů mezi silnicí a kovovými boxy. Ve stejném článku byl testován i materiál PVDF, který je pro dané využití vhodnější díky své pružnosti a odolnosti, ale má nízký pyroelektrický koeficient. Vyšší pyroelektrický koeficient mají PVDF nanokompozity, vytváří tak větší množství elektrické energie než čisté PVDF materiály.



Obrázek 3.1: Model zapojení pro „energy harvesting” z pozemních komunikací (převzato z [15])

Samotné pyroelektrické zařízení pro získávání elektrické energie ze silnic a chodníků je modelováno jako zdroj proudu (na obr. 3.1  $I_p$ ), ke kterému je paralelně připojen odpor ( $R_p$ ) a kondenzátor ( $C_p$ ). Protože směr generovaného proudu se mění v závislosti na tom, zda je povrch ochlazován nebo ohříván, je do obvodu napojen usměrňovací můstek skládající se ze 4 diod. Ty zajišťují, že do kondenzátoru  $C_E$ , do kterého ukládáme získanou elektrickou energii, vstupuje elektrický proud jedním směrem.

Získaná energie může být, kromě uložení do kondenzátorů, použita i jako zdroj pro bezdrátová zařízení a sítě, které jsou jinak závislé na napájení z baterií. (viz [10]) Pro zvýšení množství získané elektrické energie by v budoucnu bylo výhodné spojit pyroelektrický generátor se získáváním elektřiny pomocí piezoelektrického jevu.



### 3.2 Tření v brzdovém systému vozidel

Další tepelný zdroj vhodný pro výrobu elektrické energie pomocí pyroelektrického děje je tření. Jednou z konkrétních aplikací, kde může být pyroelektrický materiál takto využit, se blíže věnuje článek [16]. Jedná se o brzdový systém automobilu - během procesu brždění dochází ke tření mezi brzdovými destičkami a brzdovými kotouči (v případě kotoučových brzd). Vlivem tohoto tření se brzdy prudce ohřejí a poté se začnou pozvolna ochlazovat. Tyto změny teploty mohou být použity k získávání elektřiny zakomponováním pyroelektrického materiálu do brzdových destiček.

Pro tuto aplikaci byl použit materiál PZT, protože má velmi dobré pyroelektrické vlastnosti a dále pro svou cenovou přívětivost. Po integraci PZT do brzdových destiček bylo zjištěno, že napětí, které v PZT vzniká je přímo závislé na teplotě a nepřímo na tloušťce materiálu. Čím jsou kotoučové brzdy užší, tím vyšší je napětí během doby brždění. Přičemž změna teploty závisí i na době brždění a rychlosti vozidla.

Když jsou brzdy tenčí, jejich teplota dosahuje výrazně vyšších hodnot, proto může být pomocí pyroelektrického materiálu detekováno jejich opotřebení. Je tak možné lépe předvídat, kdy mají být brzdy vyměněny. Další výhodou tohoto způsobu detekce je fakt, že senzor ke svému fungování nepotřebuje vnější zdroj, protože si je schopen potřebnou elektrickou energii vyrobit sám. V budoucnu by mohl být pyroelektrický materiál v brzdových destičkách propojen s přístrojovou deskou vozidla a řidič by na ní mohl mít možnost sledovat stav opotřebení brzd.

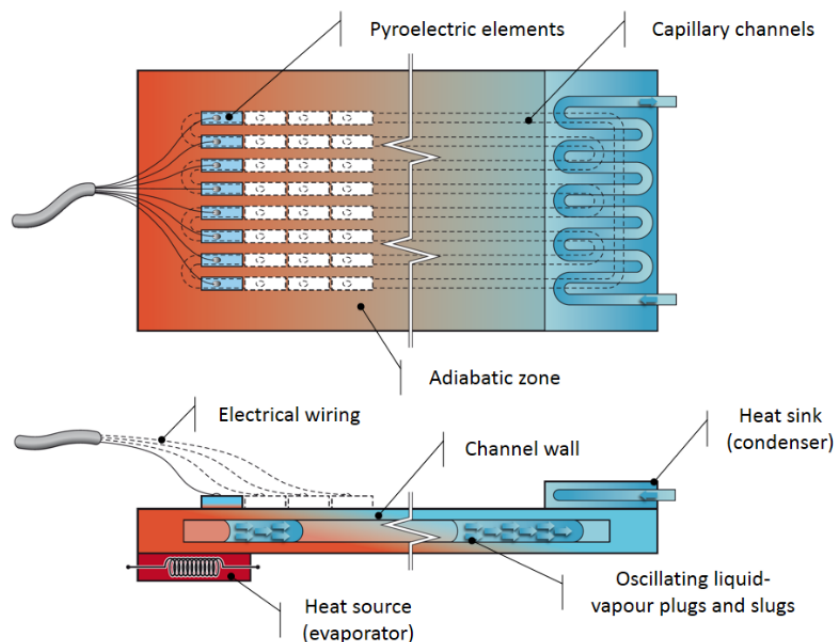
### 3.3 Chladič z kapiláních trubek

Elektrické přístroje jsou jedním z dalších zdrojů tepelné energie a teplo, které vytvářejí je potřeba odvádět, aby nedošlo k jejich přehřátí a následnému poškození. Toto odpadní teplo je ideální k přeměně na energii elektrickou za použití pyroelektrického jevu. Jednou z jeho aplikací v chladicím zařízení se věnuje článek [17].

Vzhledem k trendu zmenšování rozměrů elektroniky, je nutné hledat nová řešení, jak tato zařízení chladit. Jednou z možností je chlazení pomocí tzv. oscillating heat pipes (OHPs), ty se skládají z kapilárních trubek, uvnitř kterých je uzavřena tekutina měnící své skupenství z kapalného na plynné a naopak. Trubice tvoří uzavřenou smyčku, na jedné její straně se nachází zdroj tepla a na druhé je ochlazována. Tekutina uvnitř kapilár díky interakci mezi vypařováním a kondenzací neustále přirozeně cirkuluje. Přesuny tepla způsobují oscilace teploty na povrchu chladicího zařízení vyrobeného z OHPs. Tyto oscilace jsou příliš malé na to, aby mohl být využit např. termoelektrický generátor (0,1 – 5 K), ke stěně zařízení jsou proto připojeny pyroelektrické elementy (na obr. 3.2 vlevo), které z nich vytváří elektrickou energii.

### 3 VYUŽITÍ PYROELEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ

Kombinace této chladicí metody s pyroelektrickým „energy harversting” poskytuje elektronickým zařízením nejen potřebné chlazení, ale i dodatečný zdroj elektrické energie. Výhodou tohoto řešení je, že tepelné trubice se dají vyrobit téměř v jakékoliv velikosti a tvaru. Jsou tiché a nepotřebují žádnou údržbu, mohou se proto použít především jako chladiče pro mikroprocesory, ale i elektromotory a napěťové transformátory. Díky uzavřené konstrukci jsou vhodné do tvrdých podmínek a dalším vývojem je možná i jejich další miniaturizace.



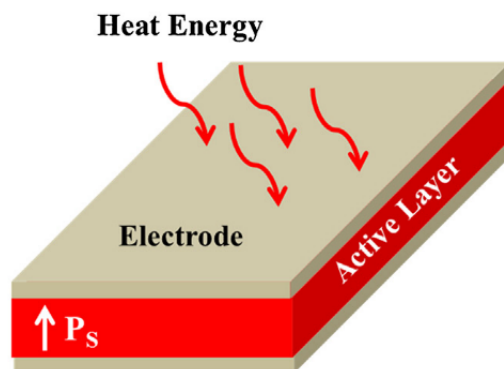
Obrázek 3.2: OHP chladič s připojeným pyroelektrickým elementem (převzato z [17])

### 3.4 Senzor využívající teplo lidského těla

Jedním ze zajímavých a často opomíjených zdrojů tepla je člověk. Lidské tělo si udržuje stabilní teplotu (kolem  $37^{\circ}\text{C}$ ), která je výrazně vyšší než teplota okolního prostředí. Do okolí je proto teplo neustále předáváno, a to dvěma způsoby: vyzařováním přes kůži a procesem dýchání. Teplo z lidského těla lze proto také využít k „energy harvesting” pomocí pyroelektrického jevu a elektrická energie takto získaná může být využita například k pohánění senzoru měřícího teplotu.

Senzor, který je popsán v článku [11], je svou konstrukcí podobný kondenzátoru. Skládá se ze dvou elektrod, mezi kterými se nachází pyroelektrická vrstva z ohybného piezokompozitu (viz obr. 3.3). Celý senzor je zalaminován a pyroelektrická vrstva v něm funguje jako dielektrikum. Proces dýchání vytváří pravidelné změny teploty. Výdech teplého, vlhkého vzduchu zvýší teplotu senzoru a nádech naopak zajistí, aby byl teplý vzduch vystřídán chladnějším vzduchem z okolí, čímž dojde k ochlazení senzoru. Pyroelektrická vrstva proto začne produkovat elektrickou energii a my na senzoru můžeme měřit napětí.

### 3 VYUŽITÍ PYROELEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ



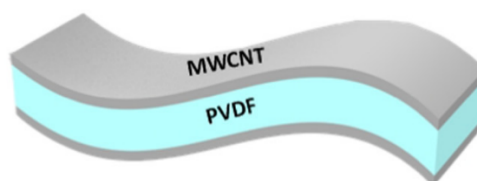
Obrázek 3.3: Konstrukce pyroelektrického senzoru měřícího teplo produkované dýcháním (převzato z [11])

Díky své velikosti a ohebnosti může být zařízení vloženo do respirátoru, plynové masky apod. a lze jej tak použít jako senzor monitorující dýchání. Najde tak uplatnění především ve zdravotním sektoru, kde je důležité dýchání monitorovat v reálném čase, protože především u starších lidí a nemocných pacientů mohou být jakékoliv odchylky v některé z fází dechu včasným varovným signálem nemoci nebo komplikací.

## 3.5 Tepelná energie z chemických procesů

Dalším z obnovitelných zdrojů energie je odpadní teplo vznikající při chemických procesech v průmyslu a laboratořích. Přestože je při těchto exotermických reakcích produkováno velké množství tepla, je poměrně těžce využitelné. Přístroje pracující v tomto prostředí jsou totiž vystaveny korozivním roztokům a plynům a dochází tak k jejich rychlému opotřebení.

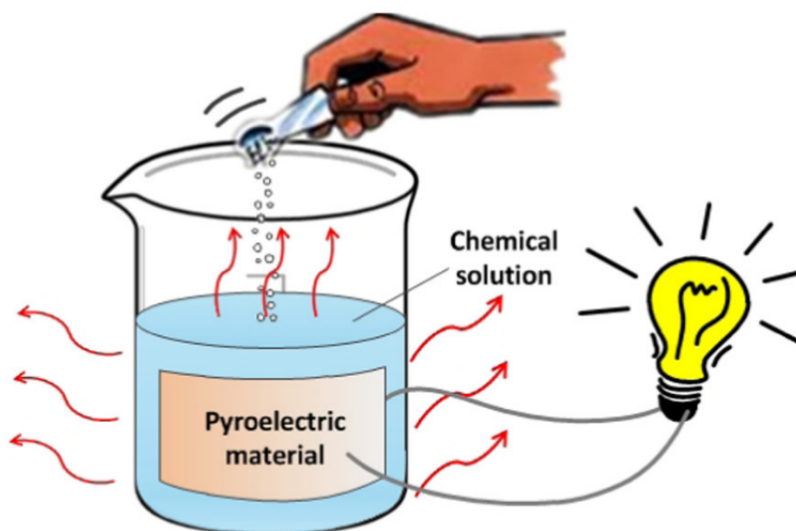
Protože chemické procesy vytváří změny teploty podle toho, v jakém jsou zrovna stádiu, můžeme je využít ke generování elektřiny pomocí pyroelektrického jevu. Jak je blíže popsáno v článku [9], lze k tomuto účelu použít jednoduché ohebné zařízení skládající se ze dvou vrstev elektrod a mezi ně vložené pyroelektrické vrstvy z chemicky stabilního materiálu (viz obr. 3.4). Vhodným materiálem je PVDF, který kromě chemické stability disponuje i nízkou váhou a ohebností. Aby se předešlo korozi elektrod, jsou vyrobeny z uhlíkového nanomateriálu, tzv. „multi-walled carbon nanotube“ (MWCNT), který je velmi odolný, vysoce elektricky vodivý a ohebný. Výhodou použití tohoto technologického řešení je, že celé zařízení je poměrně levné.



Obrázek 3.4: Konstrukce pyroelektrického generátoru vhodného pro chemický průmysl (převzato z [9])

### 3 VYUŽITÍ PYROELEKTRICKÝCH GENERÁTORŮ

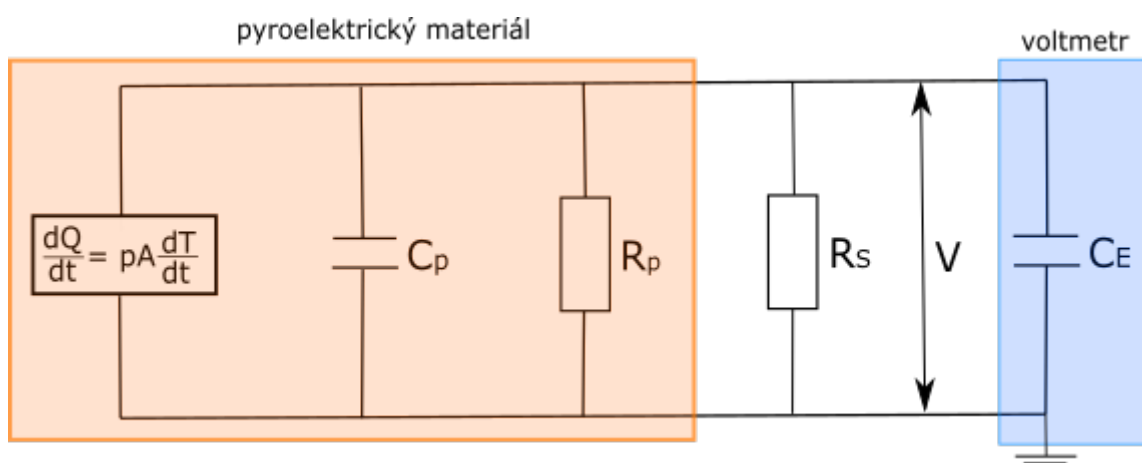
Tento pyroelektrický přístroj lze připevnit na stěnu nádoby, ve které jsou prováděny chemické procesy tvořící teplo. Ve zkoumaném případě byl umístěn na stěnu kádinky, kterou vidíme na obr. 3.5. Díky tepelným změnám uvnitř nádoby pyroelektrická vrstva generuje elektrickou energii a získaná energie je přímo úměrná změně teploty roztoku v kádince. Zařízení tak lze použít jako senzor sledující průběh chemického procesu real-time. Generovaná elektřina může pohánět malou elektroniku (např. LCD display), být ukládána v kondenzátorech pro pozdější využití, nebo lze generovaný signál bezdrátově vysílat. Chemické reakce by tak bylo možné kontrolovat dálkově.



Obrázek 3.5: Umístění pyroelektrického generátoru na stěnu kádinky (převzato z [9])

## 4 Matematický model pyroelektrického jevu

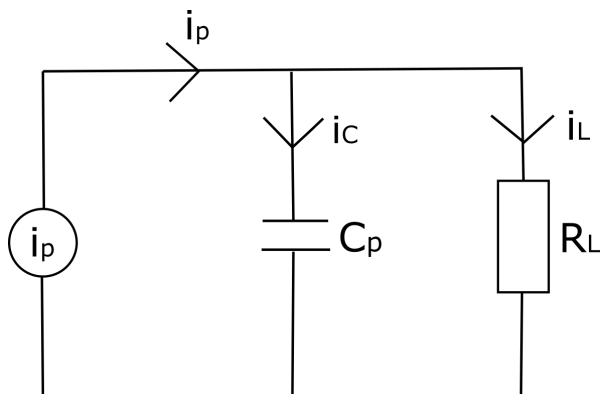
Pyroelektrický materiál je modelován jako zdroj proudu, ke kterému je paralelně připojena jeho vnitřní kapacita  $C_p$  a vnitřní odpor  $R_p$ . K němu je následně paralelně připojen odpor  $R_s$ , a vytvořená energie je měřena voltmetrem  $C_E$ . Tento model je zakreslen na obrázku 4.1, který je převzat z článku od S. B. Langa [18] z roku 1969. V dalších vědeckých člancích o pyroelektrickém jevu, např. [7] [15] se opakuje stejný způsob jeho modelování.



Obrázek 4.1: Model pyroelektrického jevu (převzato z [18])

Model znázorněný na obrázku 4.1 může být zjednodušen. Pyroelektrický materiál je izolant, odpor  $R_p$  je proto vysoký a může být z našeho modelu vynechán. Naopak  $C_E$  je příliš malá, proto může být zanedbána. Výsledný elektrický obvod je znázorněn na obrázku 4.2.

#### 4 MATEMATICKÝ MODEL PYROELEKTRICKÉHO JEVU



Obrázek 4.2: Zjednodušený model pyroelektrického jevu

Použitím 1. Kirchhoffova zákona je získána rovnice:

$$i_p = i_C + i_R \quad (4.1)$$

Proud procházející kondenzátorem se vypočítá:

$$i_c = \frac{dU}{dt} \cdot C_p \quad (4.2)$$

Po dosazení rovnic pro proudy  $i_c$  a  $i_R$  vznikne:

$$i_p = \frac{dU}{dt} \cdot C_p + \frac{U}{R} \quad (4.3)$$

Do rovnice 4.3 je dále dosazen vztah 2.1:

$$A \cdot p \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{U} \cdot C_p + \frac{U}{R} \quad (4.4)$$

Po úpravě vznikne finální tvar matematické rovnice popisující pyroelektrický obvod:

$$\dot{U} = \frac{A \cdot p}{C_p} \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{U}{R \cdot C_p} \quad (4.5)$$

#### 4 MATEMATICKÝ MODEL PYROELEKTRICKÉHO JEVU

Aby byl model kompletní, je ještě nutné vypočítat vnitřní kapacitu pyroelektrického materiálu (viz rovnice 4.6), kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $\epsilon_r$  permitivita pyroelektrického materiálu a  $h$  tloušťka vzorku. [15]

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{h} \quad (4.6)$$

Dalšími výstupy z našeho modelu, které můžeme zkoumat jsou okamžitý výkon  $p$  a energie  $E$ .

$$p = \frac{u^2}{R} \quad (4.7)$$

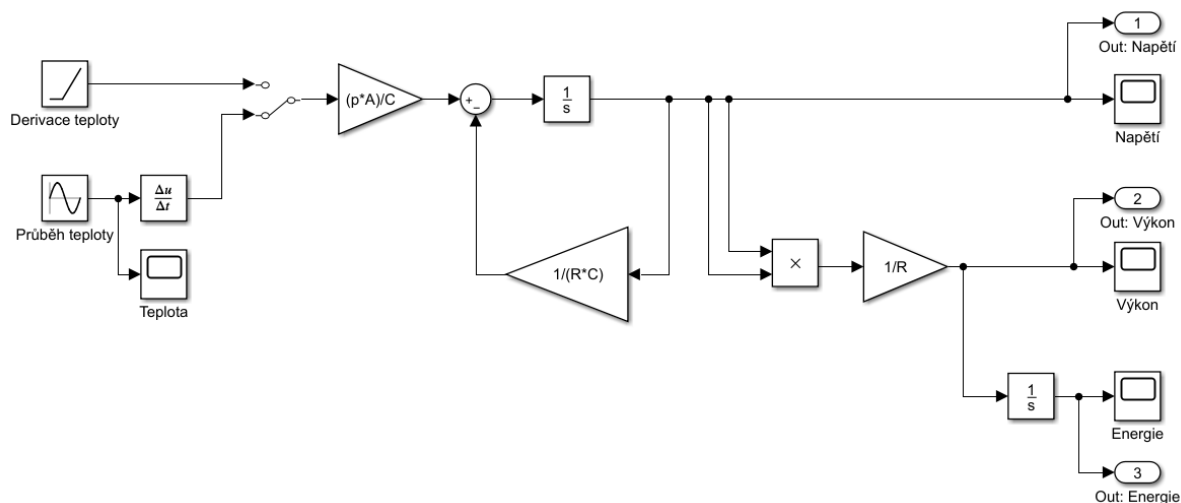
$$E = \int_0^t P dt \quad (4.8)$$

## 5 Simulace pyroelektrického jevu

### 5.1 Zpracování v Simulinku

Popsaný matematický model (rovnice 4.5) byl převeden do prostředí Simulinku. Simulace byly provedeny se třemi nám dostupnými materiály: PZT, PVDF a BaTiO<sub>3</sub>. Jejich materiálové konstanty jsou vypsány v tabulce 2.1.

Vstupem do simulace je derivace teploty, ta byla buď zvolena přímo, jako rovnoměrně rostoucí signál, nebo byl zadán průběh teploty ve formě funkce sinus, který byl následně zderivován. Mezi těmito dvěma vstupy je možné přepínat pomocí ručního přepínače, po kterém následuje elektrická část ve formě bloků gain a integrace. Výsledný signál sledujeme buď ve formě grafů, nebo v prostředí Matlabu a našimi sledovanými výstupy ze simulace jsou napětí, výkon a energie.



Obrázek 5.1: Schéma modelu pyroelektrického jevu v Simulinku



## 5.2 Výsledky simulací

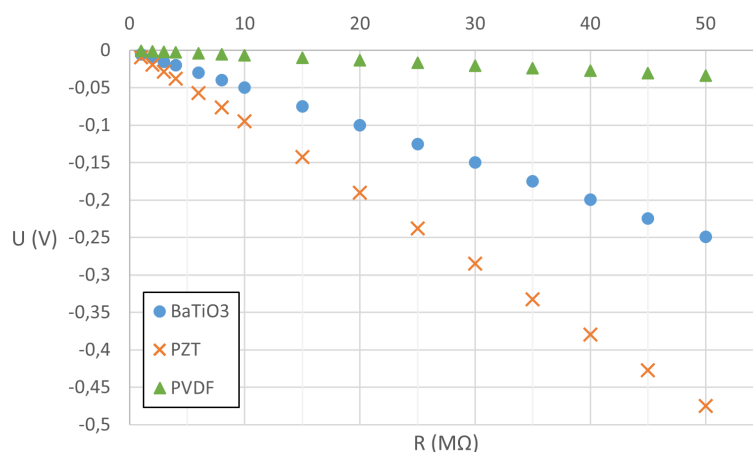
### 5.2.1 Porovnání materiálů PZT, PVDF a BaTiO<sub>3</sub>

Prvním cílem našich simulací bylo porovnání zvolených materiálů a následné vybrání nejvhodnějšího materiálu pro naši aplikaci. Pro tyto simulace byly použity parametry z tabulky 5.1, kde  $a$  odpovídá délce strany pyroelektrického vzorku a  $h$  je jeho tloušťka. Materiál PVDF se většinou používá ve formě tenké fólie, proto pro něj byla zvolena menší tloušťka.

materiál	$a$ (mm)	$h$ (mm)
PZT	5	0,5
PVDF	5	0,1
BaTiO <sub>3</sub>	5	0,5

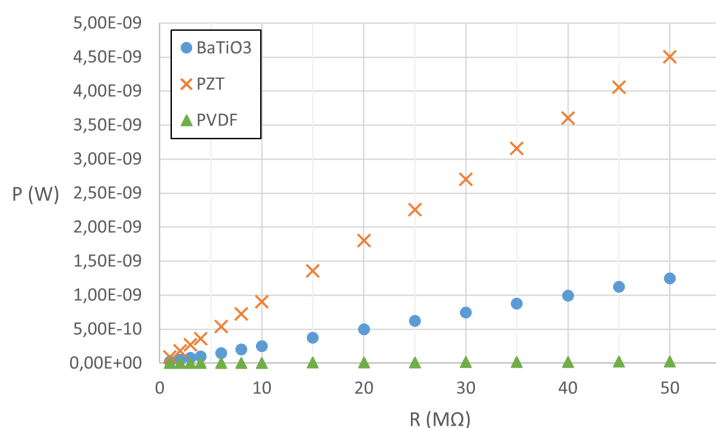
Tabulka 5.1: Geometrie vzorků pro simulace z kapitoly 5.2.1

Bločkem Ramp byl nastaven vstupní signál odpovídající derivaci teploty  $dT/dt$ . Tento signál byl následně vynásoben pyroelektrickým koeficientem daného materiálu, jeho plochou  $A$  a podělen kapacitou  $C$ . Kapacita byla vypočítána z hodnot v tabulkách 2.1 a 5.1 pomocí vzorce 4.6. Po integraci signálu vzniká první námi sledovaný výstup ze simulace - napětí na rezistoru. Provedli jsme sérii simulací pro každý materiál, ve kterých byla měněna velikost odporu  $R$ . Vývoj napětí a výkonu pro různé změny teploty byl následně zaznamenán do grafů. Přičemž výkon zobrazený na grafech odpovídá konečné hodnotě výkonu po uplynutí doby simulace (pro děje dlouhé 10 sekund byl zaznamenán výkon v čase 10 s atd.).



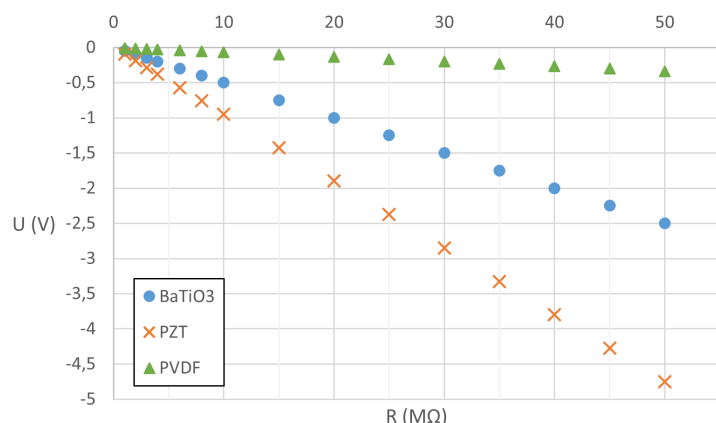
Obrázek 5.2: Graf napětí pro vstupní podmínky  $\Delta T = 1$  K za 10 sekund

## 5 SIMULACE PYROELEKTRICKÉHO JEVU



Obrázek 5.3: Graf výkonu pro vstupní podmínky  $\Delta T = 1$  K za 10 sekund

První testovaný děj probíhal 10 sekund, jednalo se o ohřívání o 1 K. Na grafu 5.2 je vidět, že absolutní hodnoty napětí na materiálu PZT byly výrazně větší než u zbylých dvou materiálů. Na grafu 5.3 lze sledovat, že výkony PZT jsou také vyšší než u BaTiO<sub>3</sub> a PVDF. Na grafech je patrné, že při těchto pomalých dějích pyroelektrický materiál vytváří pouze velmi malé množství elektrické energie.

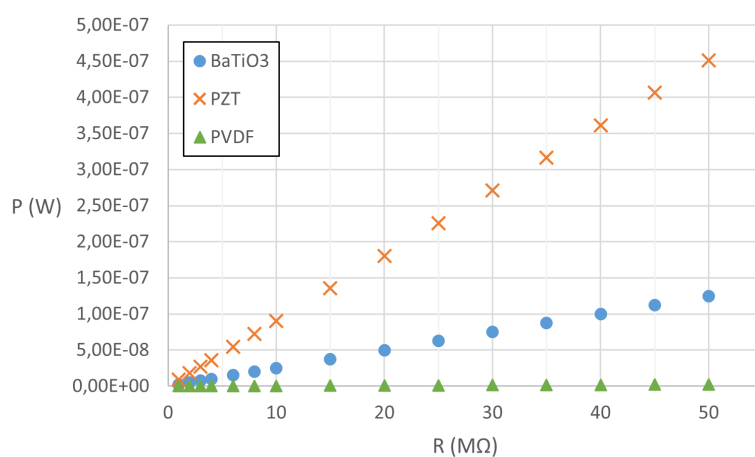


Obrázek 5.4: Graf napětí pro vstupní podmínky  $\Delta T = 10$  K za 1 minutu

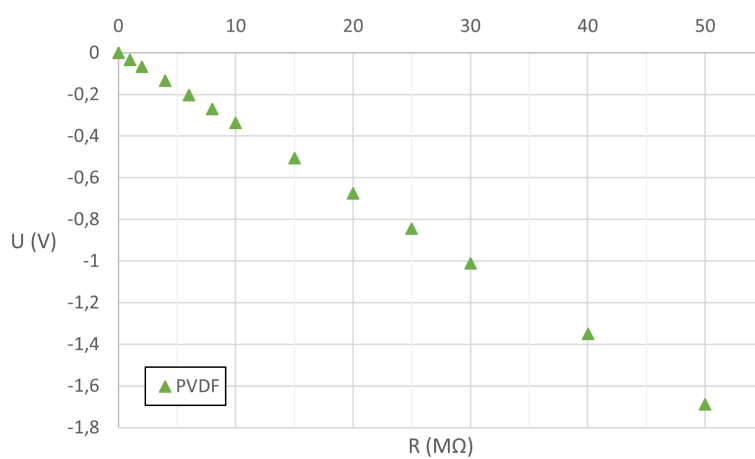
Na grafech 5.4 a 5.5 jsou výsledky simulace dalšího relativně pomalého děje. Tentokrát byla teplota zvyšována 1 minutu tak, aby došlo k ohřátí o 10 K. Lze na nich pozorovat, že při pomalých dějích nedosáhl výkon ani řádu mikrowattů. A to ani při simulaci s námi nejvyšším zvoleným odporem o velikosti 50 MΩ. Materiál PZT znovu dosahoval v rámci vybraných materiálů nejlepších výsledků. Tento fakt se opakuje i v dalších měřeních. Je proto ideální k použití pro naši aplikaci.

Následující simulace musela být rozdělena do dvou skupin. Pro PZT a BaTiO<sub>3</sub> byl simulován růst teploty 100 K za 10 sekund (na obr. 5.8, 5.9). Zato PVDF bylo ohříváno za stejný čas o 50 K (5.6, 5.7). Materiály byly rozděleny, protože PVDF je plast a při teplotě vyšší než 70° by došlo k jeho roztavení.

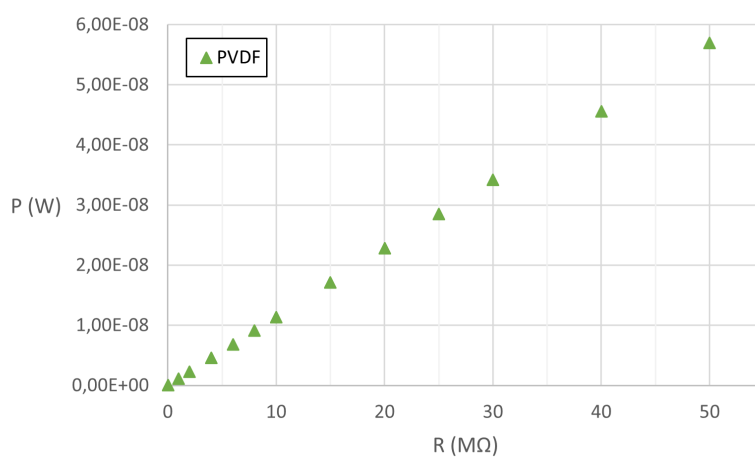
## 5 SIMULACE PYROELEKTRICKÉHO JEVU



Obrázek 5.5: Graf výkonu pro vstupní podmínky  $\Delta T = 10$  K za 1 minutu

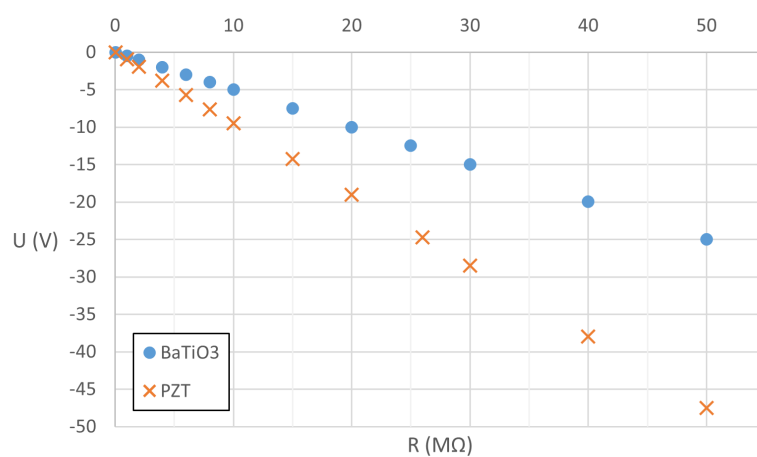


Obrázek 5.6: Graf napětí pro vstupní podmínky  $\Delta T = 50$  K za 10 sekund

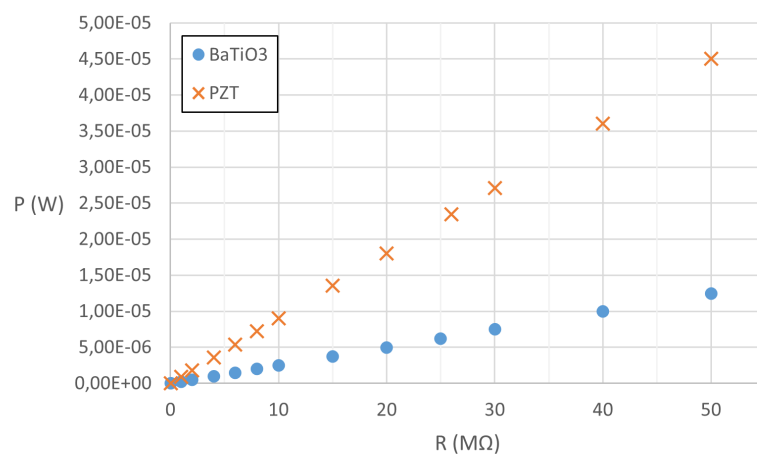


Obrázek 5.7: Graf výkonu pro vstupní podmínky  $\Delta T = 50$  K za 10 sekund

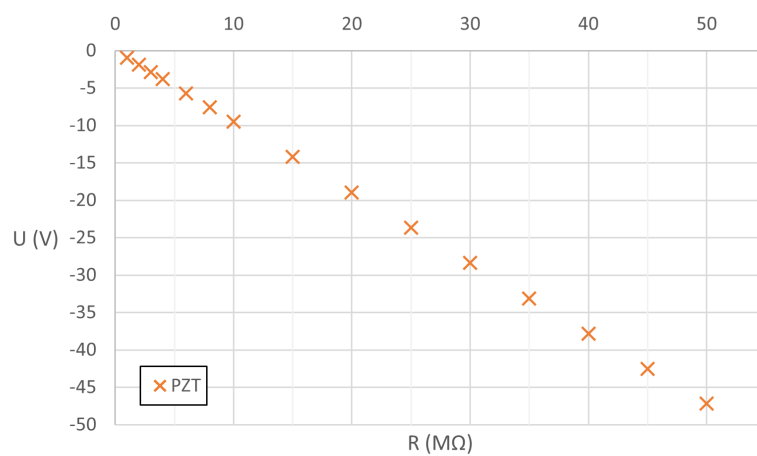
## 5 SIMULACE PYROELEKTRICKÉHO JEVU



Obrázek 5.8: Graf napětí pro vstupní podmínky  $\Delta T = 100$  K za 10 sekund

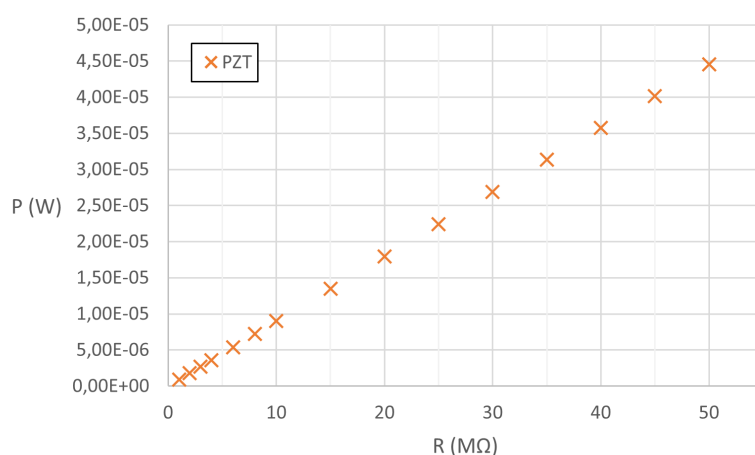


Obrázek 5.9: Graf výkonu pro vstupní podmínky  $\Delta T = 100$  K za 10 sekund



Obrázek 5.10: Graf napětí pro vstupní podmínky  $\Delta T = 100$  K za 1 sekundu

## 5 SIMULACE PYROELEKTRICKÉHO JEVU

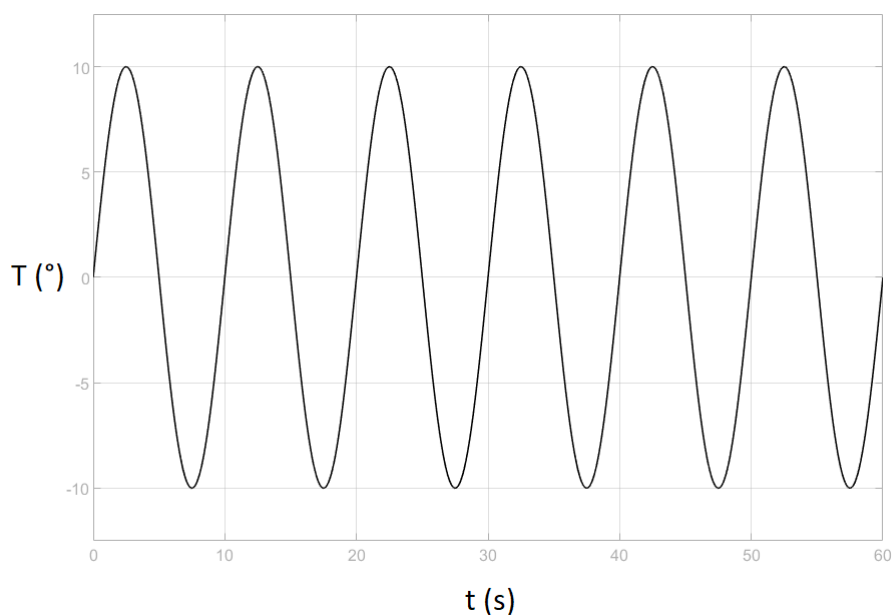


Obrázek 5.11: Graf výkonu pro vstupní podmínky  $\Delta T = 100$  K za 1 sekundu

Poslední simulací (5.10, 5.11) byl ohřev o 100 K za 1 sekundu. Podobné rychlé tepelné děje probíhají např. v leteckém průmyslu. Z grafů je patrné, že čím je tepelný děj rychlejší, tím je pyroelektrický jev vhodnějším zdrojem elektrické energie.

### 5.2.2 Aplikace PZT jako zdroj pro bezdrátový senzor

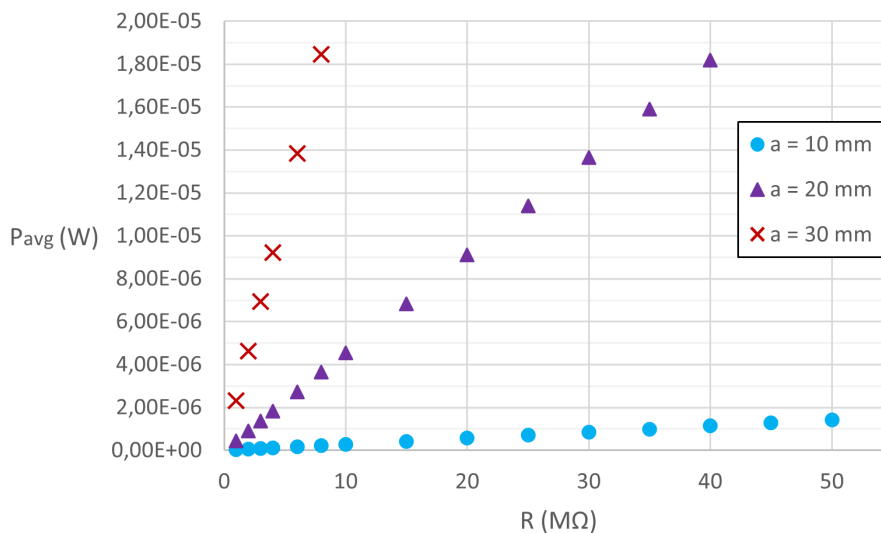
Naší zvolenou aplikací je bezdrátový senzor. Podobné senzory byly popsány v řešeršní části této práce v podkapitolách 3.4 a 3.5. Malá elektronika potřebuje ke svému provozu elektrický výkon minimálně 1 mW, naším cílem tedy bylo zjistit, zda elektřina získaná pomocí pyroelektrického jevu bude stačit pro pohánění tohoto bezdrátového senzoru.



Obrázek 5.12: Průběh teploty jako vstup do simulací

## 5 SIMULACE PYROELEKTRICKÉHO JEVU

Vzhledem k výsledkům z předchozích měření byl do simulací zvolen materiál PZT o tloušťce 0,5 mm. Vstupem byla změna teploty ve tvaru funkce sinus, s periodou 10 s. Rozsah teplot byl zvolen od  $-10^\circ$  do  $10^\circ$ . (viz. 5.12) Měněnými parametry byla délka strany vzorku  $a$  (mm) a velikost odporu  $R$  ( $M\Omega$ ). Sledovaným výstupem byl průměrný výkon  $P_{avg}$  (W), který byl zaznamenán do grafu 5.13.



Obrázek 5.13: Průměrný výkon

Ani jedna ze zvolených geometrií nedosáhla potřebného průměrného výkonu 1 mW, maximální hodnota, kterou jsme získali byla v řádech  $\mu$ W. Abychom dostali požadovaný výkon, by byl potřeba větší kus PZT materiálu.

## 6 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zhodnocení pyroelektrického jevu jako autonomního zdroje elektrické energie. Nejprve byl tento fyzikální jev teoreticky popsán, a to z makroskopického i mikroskopického pohledu. Následně byly představeny různorodé materiály, u kterých byl pyroelektrický jev pozorován. Z nich byly vybrány tři pro nás dostupné (PZT, PVDF a  $\text{BaTiO}_3$ ) a jejich konstanty jsme poté použili pro simulace. U těchto keramických bylo během simulací zanedbáno jejich prohřívání.

Simulace byly provedeny v modelu navrženém v prostředí MATLAB-Simulink, díky kterým bylo zjištěno, že použití pyroelektrického jevu jako zdroje elektrické energie je vhodné pro rychlé tepelné děje. Pro pomalé děje je téměř nepoužitelný, nebo minimálně klesá praktičnost jeho použití. Některé z aplikací, které byly popsány v rešeršní části této práce proto nejsou ideálními kandidáty na „energy harvesting” pomocí pyroelektrického jevu. Jedním z těchto pomalých dějů je např. použití na pozemních komunikacích. Naopak nejrychlejším tepelným dějem, který jsme zkusili simulovat bylo ohřátí z  $0^\circ\text{C}$  na  $100^\circ\text{C}$  během sekundy, které by mohlo najít uplatnění pro letecký a vesmírný průmysl, kde by si tyto stroje mohly při průchodu atmosférou např. nabít baterie.

Ze zkoumaných materiálů dosahovala nejlepších výsledků keramika PZT. Druhým nejlepším materiálem byl  $\text{BaTiO}_3$ , ale ten je používán hlavně k laboratorním pokusům. V rešerši se ani jednou nevyskytoval, a tak nejspíš není moc využíván v technické praxi. PVDF vyšel ze tří zkoumaných materiálů nejhůře, ale i přes nízký pyroelektrický koeficient a následný nízký výkon je v praxi používán, hlavně pro své mechanické vlastnosti, protože je pružnější než PZT a navíc i chemicky odolný.

Nakonec byly provedeny simulace, které zjišťovaly, zda je pyroelektrický jev vhodný jako zdroj energie pro bezdrátový senzor. Bylo zjištěno, že při použití materiálu PZT o velikosti strany 10 mm, 20 mm ani 30 mm není vytvořeno dostatečné množství elektrické energie potřebné pro zvolenou aplikaci. Když bychom chtěli pyroelektrický jev použít jako zdroj elektrické energie, museli bychom použít větší kus pyroelektrického materiálu, pravděpodobně s délkou strany alespoň 30 cm.

I přesto, že se pyroelektrický jev nevyšel dle našich pokusů jako vhodný generátor elektrické energie, díky svým vlastnostem najde využití jako senzor teploty pro některé technologické procesy. Závěrem ho tedy lze stále označit za zajímavý fyzikální děj, který je hoden hlubšího studování v rámci dalších bakalářských prací.

# Literatura

- [1] CARRILLO, L.Y. a Y. BAYAZITOGLU. Near-Field radiative heat exchange analysis of a spacecraft waste heat converter design. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* [online]. 2012, 4(2) [cit. 2021-02-02]. ISSN 19485085. Dostupné z: <doi:10.1115/1.4005731>
- [2] LANG, Sidney B. Pyroelectricity: From ancient curiosity to modern imaging tool. *Physics Today* [online]. American Institute of Physics, 2005, 58(8), 31 [cit. 2021-01-23]. ISSN 0031-9228. Dostupné z: <doi.org/10.1063/1.20629161>
- [3] LANG, Sidney B., DAS-GUPTA, Dilip K. Pyroelectricity: Fundamentals and applications. In: *Handbook of advanced electronic and photonic materials and devices* [online]. Academic Press, 2001. p. 1-55. [cit. 2021-01-24]. ISBN 9780125137454. Dostupné z: <doi.org/10.1016/B978-012513745-4/50036-6>
- [4] BOWEN, C. R., H. A. KIM, P. M. WEAVER a S. DUNN. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. *Energy Environmental Science* [online]. 2014, 7(1), 25-44 [cit. 2021-01-23]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <doi:10.1039/c3ee42454e>
- [5] What is „PZT“?. *PZT Properties & PZT Manufacturing* [online]. APC International, Ltd., 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/piezot-theory/pzt.html>
- [6] PVDF – Polyvinylidenefluorid. *PVDF Polymerové typy – Resinex* [online]. Czech Republic, RESINEX Group, © 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/pvdf.html>
- [7] BOWEN, C. R., J. TAYLOR, E. LEBOULBAR, D. ZABEK, A. CHAUHAN a R. VAISH. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy Environmental Science* [online]. 2014, 7(12), 3836-3856 [cit. 2021-01-23]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <doi:10.1039/c4ee01759e>
- [8] OTČENÁŠEK, Petr. *Elektroenergetika ve 21. století* [pdf]. Praha, duben 2006 [cit. 2021-03-29]. Pdf bylo volně dostupné v rámci vzdělávání od firmy ČEZ, ale již se nedá dohledat v nové struktuře jejich webu. Dostupné z URL: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/elektricka-energie-cr.pdf>
- [9] ZHAO, Tingting, Weitao JIANG, Dong NIU, Hongzhong LIU, Bangdao CHEN, Yongsheng SHI, Lei YIN a Bingheng LU. Flexible pyroelectric device for scavenging thermal energy from chemical process and as self-powered temperature monitor. *Applied energy* [online]. Elsevier, 2017, 195, 754-760 [cit. 2021-03-01]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <doi:10.1016/j.apenergy.2017.03.097>



## LITERATURA

- [10] BHATTACHARJEE, Sudip, BATRA, A. K., CAIN, Jacob. Carbon nano fiber reinforced cement composite for energy harvesting road. In: *Green Streets and Highways 2010: An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes* [online]. 2010 [cit. 2021-03-19]. p. 258-271. ISBN: 9780784411483 Dostupné z: <doi.org/10.1061/41148(389)22>
- [11] SULTANA, Ayesha, Md. Mehebub ALAM, Tapas Ranjan MIDDYA a Dipankar MANDAL. A pyroelectric generator as a self-powered temperature sensor for sustainable thermal energy harvesting from waste heat and human body heat. *Applied energy* [online]. Elsevier, 2018, **221**, 299-307 [cit. 2021-03-01]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.003>
- [12] HOSSAIN, A a M.H RASHID. Pyroelectric detectors and their applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. IEEE, 1991, **27**(5), 824-829 [cit. 2021-01-23]. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <doi:10.1109/28.90335>
- [13] Infrastruktura silniční dopravy v ČR a kraji k 1. 1. 2016. *Český statistický úřad* [online]. České Budějovice, Krajská správa ČSÚ, 30.05.2016 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xc/infrastruktura-silnicni-dopravy-k-1-1-2016>
- [14] BATRA, A, Sudip BHATTACHARJEE, A CHILVERY a A BATRA. Energy harvesting roads via pyroelectric effect: a possible approach. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. 2011 [cit. 2021-01-23]. ISBN 9780819486097. ISSN 0277-786X. Dostupné z: <doi:10.1117/12.884333>
- [15] HU, J., J. TAO a G. WU. Energy harvesting from pavement via PVDF: Hybrid piezo-pyroelectric effects. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. SPIE, 2016 [cit. 2021-01-23]. ISBN 9781510600409. ISSN 0277786X. Dostupné z: <doi:10.1117/12.2218369>
- [16] TABBAI, Yassine, et al. Friction and wear performance of disc brake pads and pyroelectric energy harvesting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* [online]. Heidelberg: Springer Nature B.V, 2021, **8**(2), 487-500 [cit. 2021-03-19]. ISSN 22886206. Dostupné z: <doi:10.1007/s40684-020-00195-6>
- [17] ZABEK, D., J. TAYLOR, V. AYEL, Y. BERTIN, C. ROMESTANT a C. R. BOWEN. A novel pyroelectric generator utilising naturally driven temperature fluctuations from oscillating heat pipes for waste heat recovery and thermal energy harvesting. *Journal of Applied Physics* [online]. AIP Publishing, 2016, **120**(2) [cit. 2021-03-01]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <doi:10.1063/1.4958338>
- [18] LANG, Sidney B., Steven A. SHAW, Lynn H. RICE a K. D. TIMMERHAUS. Pyroelectric Thermometer for Use at Low Temperatures. *Review of Scientific Instruments* [online]. American Institute of Physics, 1969, **40**(2), 274-284 [cit. 2021-01-23]. ISSN 0034-6748. Dostupné z: <doi:10.1063/1.1683919>